



USE OF HIDROLOGICAL MODELS TO DEFINE WATERSHED ON PARAMO ECOSYSTEMS

UTILIZACIÓN DE MODELOS HIDROLÓGICOS PARA LA DETERMINACIÓN DE CUENCAS EN ECOSISTEMAS DE PÁRAMO

Cely, O. A.*

*Biólogo. Omar Alexis Cely Reyes. Candidato a Maestría en Ingeniería Ambiental, Programa Maestría en Ingeniería Ambiental, Facultad de Ingeniería, Universidad Pedagógica y Tecnológica de Colombia, Tunja. Tel: (57+8) 7405626. e-mail: ocely@corpoboyaca.gov.co.

Abstract

This study is focused on hydrological analysis of water networks that emerges from Cortadera Paramo, located in the municipalities of Toca and Siachoque (Boyacá, Colombia). The analysis was divided in five sub-basins due to the size and confluence of waters to the Copa dam which is the final site of delivery of these. In terms of delimitation of watershed was taken in consideration different sub basins, a morphometric analysis of digital elevation model (DEM), Arcgis 9.3 and SWAT (Soil and Water Assessment Tool). The vector and raster digital data used on 1:250,000 scales were provided by the Regional Autonomous Corporation of Boyacá (CORPOBOYACÁ) and Geographic Institute Agustín Codazzi (IGAC). The result allows knowing the hydrological behavior of the total basin and five sub-basin as tool for planning and land management, institutional decision making and natural resource management.

Keywords: SWAT, Paramo, Hydrology

Resumen

El presente estudio hidrológico está enfocado al análisis de la red hídrica que se desprende del páramo de la Cortadera ubicado en los municipios de Toca y Siachoque (Boyacá, Colombia). Para el análisis realizado, la cuenca se dividió en cinco sub-cuencas debido al tamaño de esta y la confluencia de las aguas hacia la represa de la Copa sitio final de entrega de las mismas. Para la delimitación de la cuenca hidrográfica se tuvieron en cuenta las diferentes sub-cuencas, un análisis morfométrico, un modelo de elevación digital (DEM), Arcgis 9.3 y el programa SWAT (Soil and Water Assessment Tool). La información digital vectorial y raster a escala 1:250.000 utilizada fue aportada por la Corporación Autónoma Regional de Boyacá (CORPOBOYACA) y por el Instituto Geográfico Agustín Codazzi (IGAC). El resultado obtenido permite conocer el comportamiento hidrológico de la cuenca total y de las cinco sub-cuencas como herramienta para la planeación y ordenamiento territorial, la toma de decisiones de carácter institucional y el manejo de los recursos naturales.

Palabras Claves: SWAT, Páramo, Hidrología



1. INTRODUCCIÓN

Los ecosistemas de páramo se consideran únicos, se ubican en zonas tropicales entre 8°N y 11°S de latitud. En todo el continente Americano solo en Colombia, Venezuela, Ecuador, Perú y Costa Rica cuentan con páramos tropicales ubicados, casi todos, salvo los de la Sierra Nevada de Santa Marta y los de Costa Rica, en la Cordillera de los Andes (Morales *et al.*, 2007).

En Colombia, los ecosistemas de Páramo ocupan cerca de dos millones de hectáreas y de estas Boyacá alberga cerca del 20% de los Páramos de Colombia presentando una alta representatividad de este tipo de ambientes (Morales *et al.*, 2007). Estos mágicos ecosistemas utilizados por los indígenas como lugares sagrados y sitios de rituales, que luego fueron utilizados por los conquistadores como vías de comunicación con el interior de los Andes y que con el aumento de la población y la disminución de áreas para la producción agropecuaria han sido utilizados indiscriminadamente para la siembra de papa, maíz, cebada, pastoreo intensivo y plantación de pinos disminuyendo su calidad ambiental.

Poco conocidos debido a las condiciones extremas de clima, topografía, accesibilidad pero que debido a las condiciones de cobertura vegetal, tipo de suelos y almacenamiento de agua brindan bienes y servicios ambientales a la comunidad en general como la regulación del ciclo hidrológico, captura de carbono, endemismos, reducción de la erosión de los suelos

de alta montaña y provisión de agua.

La fragilidad de los páramos radica en que son ecosistemas adaptados a condiciones extremas como topografía escarpada e inclinada, altura sobre el nivel de mar superior a 3000 metros, radiación solar intensa durante la mayor parte del día, temperaturas bajas durante la noche, lluvias permanentes y tormentas torrenciales, corrientes de aire frías durante todo el día que influyen en la alta capacidad de almacenamiento de agua formando lagunas, humedales, turberas que captan y regulan el agua hacia sitios más bajos (Ruiz *et al.*, 2008, Navarrete, 2003). Se dice que en el páramo se produce el agua y que poco a poco es soltada para ensanchar quebradas

y riachuelos que aumentan las grandes corrientes aguas abajo.

Existen numerosos estudios e investigaciones que tienen en cuenta el componente florístico y faunístico de los Páramos, pero la hidrología es poco estudiada a pesar que la gran parte de los centros poblados ubicados en los Andes Suramericanos dependen directamente del agua proveniente de estos para suplir las necesidades tanto urbanas como industriales.

MARCO TEÓRICO

Los páramos se encuentran seriamente amenazados debido, principalmente, a la ampliación de la frontera agropecuaria, a la minería, a las quemas inducidas, a la tala de bosques, a la contaminación de sus aguas y a la influencia antrópica (IAvH, 2011; Armenteras *et al.*, 2003;





Díaz *et al.*, 2006 citado por Ruiz *et al.*, 2008, Díaz-Granados *et al.*, 2005).

Comparado con cuencas montañosas en otras regiones, los ríos que descienden desde los páramos tienen un flujo base sostenido como resultado de la elevada capacidad de regulación del agua del páramo. Sin embargo, esta función está amenazada por un incremento de la actividad humana durante los últimos años (Buytaert *et al.*, 2006).

Según el Ministerio de Medio Ambiente (2002), el páramo es un ecosistema donde elementos como la vegetación, el suelo y subsuelo, han desarrollado un gran potencial para interceptar, almacenar y regular el agua; la importancia de este ecosistema radica fundamentalmente entonces, en su capacidad para interceptar y almacenar agua, y regular los flujos hídricos superficiales y subterráneos.

Los ecosistemas de Páramo hacen referencia directa al agua y por eso son denominados como ecosistema de humedales alpino neotropical andinos como ecosistemas «fuentes de agua», (Tobón 2009) y para Molano son “espacios montañosos hijos del agua” (Rivera *et al.*, 2010).

De otra parte, los páramos Colombianos albergan una rica flora endémica y prestan múltiples servicios ambientales principalmente como cuencas abastecedoras de agua para consumo, actividades productivas e hidro-energéticas, así como áreas de influencia de los principales embalses, represas y estrellas hidrográficas.

En los páramos colombianos, la humedad se manifiesta por el rocío, la constante neblina y las lloviznas frecuentes: características de las altas montañas tropicales de clima húmedo. Esta gran humedad no está directamente relacionada con una precipitación alta, ya que a pesar de que existen regiones donde la precipitación anual es superior a 3000 mm, muchos páramos tienen una precipitación media anual aproximada de 1000 mm o menos; Rivera *et al.*, 2010 reportan precipitaciones anuales en páramos Colombianos que pueden oscilar entre valores bajos de 600 mm/año hasta más de 3000 mm/año; sin embargo, por las bajas temperaturas y la alta nubosidad, la evapotranspiración es reducida y es ésta una de las principales razones del alto rendimiento hídrico de estos ecosistemas.

De esta forma, debido a las características hidrogeológicas de los páramos, con diversidad de sustratos geológicos fracturados que alimentan acuíferos superficiales y subterráneos, los convierten en zonas que favorecen la acumulación y regulación de las aguas subterráneas, principalmente por la disposición de sistemas de fallamiento y de diaclasas locales claves en la percolación e infiltración del agua superficial.

Así mismo, todas estas características expresan la importancia del páramo por ser regulador hídrico, sostener el flujo base de las corrientes que nacen y descienden de estos ecosistemas hacia las áreas medias y bajas, y





ofrecer excelente calidad de agua, propiedades derivadas de su alta capacidad de almacenamiento asociada al potencial de infiltración, a los complejos de humedales, a la morfología de las cuencas, al tipo de suelos, a la formación de niebla, a la capacidad de retención de las plantas, entre otros (Rivera y Rodríguez, 2011).

2. MATERIALES Y MÉTODOS

2.1. MODELOS HIDROLÓGICOS

En hidrología, los modelos numéricos son una herramienta básica con la que se puede estudiar el ciclo hidrológico y las relaciones hidrológicas con los problemas científicos y prácticos. Desde mediados de 1960, numerosos modelos hidrológicos se han establecido desarrollándolos a partir de los principios simples y conceptos de modelos distribuidos y basados en la física. Entre estos modelos, la Herramienta de Evaluación de Suelo y Agua (SWAT), desarrollado en la década de 1990, es un modelo para el estudio de cuencas hidrográficas de gran tamaño.

SWAT fue diseñado para aceptar entradas disponibles a fin de permitir el uso general en grandes regiones, y también ser continuo en el tiempo y de esta forma permitir la simulación de los factores de gestión de la tierra, validado en un amplio intervalo de regímenes hidrológicos. SWAT incorpora las características de varios institutos como el Departamento de Agricultura de EE.UU (USDA), Servicio de Investigación Agrícola (ARS), igualmente los modelos han

sido objeto de continua revisión y ampliación de sus capacidades, (Arnold y Fohrer, 2005, citado por Chen and Wu, 2012).

El programa ha sido desarrollado para predecir el impacto de la gestión de la tierra sobre el agua, los sedimentos y rendimiento químico agrícola en las cuencas grandes y complejas. SWAT es un modelo integrado que incluye componentes tales como el clima, la hidrología, suelo, nutrientes, pesticidas, manejo de la tierra, bacterias y agentes patógenos. El modelo es un simulador computacionalmente eficiente de hidrología y calidad del agua a varias escalas que se ha utilizado en muchas aplicaciones internacionales (Arnold y Allen, 1996; Abbaspour *et al.*, 2007; Yang *et al.*, 2007; Schuol *et al.*, 2008a, 2008b); incluye procedimientos para describir cómo la concentración de CO₂, la precipitación, la temperatura y la humedad afectan el crecimiento vegetal. También simula la evapotranspiración, la nieve y la generación de escorrentía, y se utiliza para investigar los impactos del cambio climático (Abbaspour *et al.*, 2009; Eckhardt y Ulbrich, 2003; Fontaine *et al.*, 2001), citado por Rouholahnejad *et al.*, 2012.

2.2. DETERMINACIÓN DE CUENCAS

SWAT es un modelo de simulación continua que opera en intervalos de tiempo diarios, la heterogeneidad espacial de la cuenca se tiene en cuenta, a partir de información del modelo de elevación digital, los suelos y los datos de uso de la tierra





por medio de Sistemas de Información Geográfica (SIG). La parametrización espacial del modelo SWAT se realiza dividiendo la cuenca en sub-cuencas a partir de la topografía. Estos se subdividen en unidades de respuesta hidrológica (HRU) basado en las características del suelo y uso de la tierra. Estos datos y parámetros relacionados se almacenan en archivos de texto. Un proyecto de resolución alta puede fácilmente resultar en miles de archivos de entrada, lo que haría más difícil de reconfigurar o actualizar los parámetros del modelo. Por esta razón, cada parte del modelo genera data bases y shape files para reducir el tamaño de los datos.

3. CUENCA PÁRAMO DE LA CORTADERA

El páramo de Cortadera tiene una extensión de 27.031,86 hectáreas (Amaras, 2009), se ubica en los municipios de Toca, Tuta, Siachoque y Pesca, hace parte del complejo Tota-Bijagual-Mamapacha. Es muy importante debido a la provisión de agua para estos municipios y en especial para el abastecimiento de la represa de la Copa y río Pesca, conforma un corredor hacia el sur-centro de la cuenca del Río Chicamocha, igualmente aporta aunque en menor proporción a el río Jordán, río Tuta y río Salitre, que hacen parte de la cuenca alta del río Chicamocha.

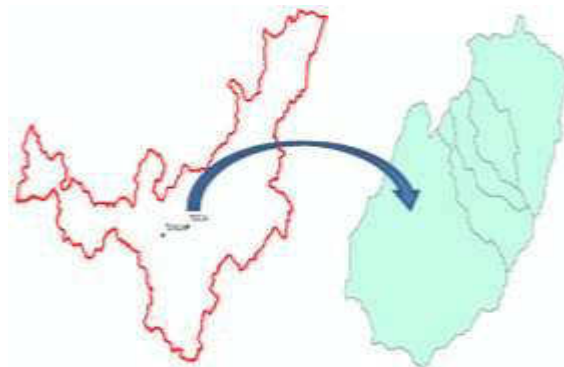


Figura 1. Ubicación de la Cuenca Páramo de la Cortadera.

3.1 METODOLOGÍA PARA LA DETERMINACIÓN DE LAS CUENCAS

La extensión ArcSWAT ArcGIS es un paquete de análisis de datos geográficos diseñado para ayudar a generar archivos de entrada SWAT y analizar específicamente información resultante a partir de simulaciones usando características principales de ArcGIS. Con la interface se puede:

- Crear archivos de entrada directamente desde tablas y mapas raster de ArcGIS.
- Correr el modelo SWAT sin salir de la interface.
- Mostrar resultados de SWAT usando los diferentes documentos de ArcGis como tablas, gráficos y mapas.

Las cuencas se determinaron a partir del Modelo de Elevación Digital (DEM) con resolución de 30 m y con el programa SWAT que delimita las cuencas de acuerdo a la topografía y a las corrientes de agua identificadas en el modelo. A cada corriente de agua identificada dentro del modelo, se le asigna el punto de salida y con este el programa genera automáticamente el límite de cada cuenca y su red



hídrica.

- Abrir una carpeta donde se va a guardar el trabajo.
- Identificar en el DEM la zona de trabajo para luego extraerla.
- Crear una geodatabase

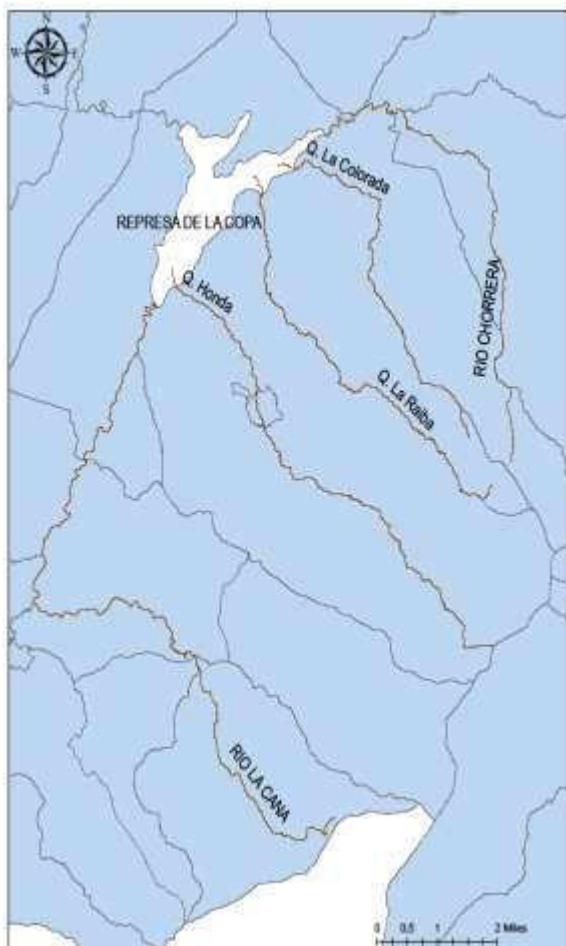
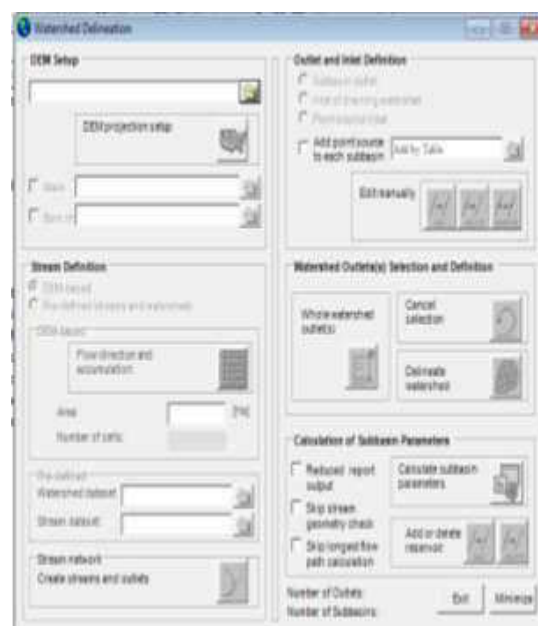
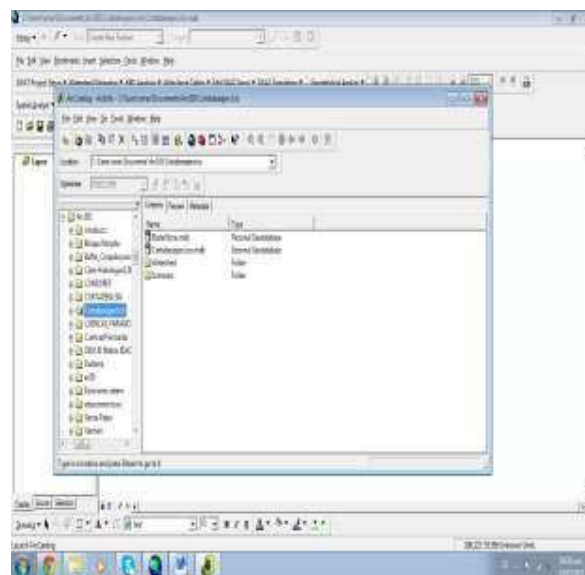


Figura 2: Red hídrica Represa de la Copa

Identificar la zona de trabajo en el DEM e ingresar al programa SWAT, se desplegará el siguiente cuadro de diálogo:



Con este procedimiento se definen a partir de la información del DEM, el flujo, sub-cuencas, salida o cierre de la cuenca y cálculo de parámetros de las sub-cuencas.



4. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Luego de corrido el programa, el sistema determina las cuencas como aparece en la siguiente figura:

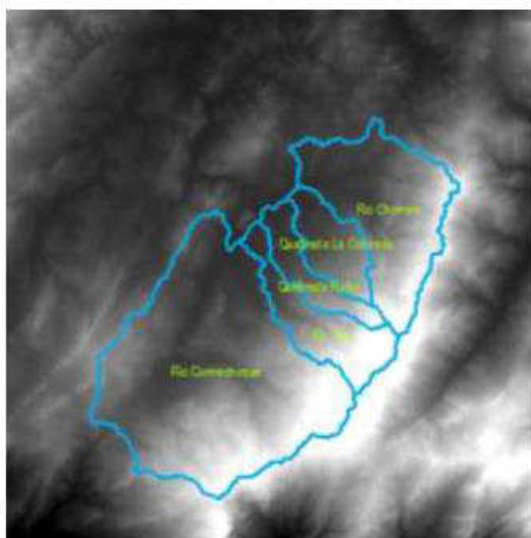


Figura 3: Cuencas determinadas a partir del Modelo de Elevación Digital.

Como se puede apreciar, el modelo al ser una interface de ArcGIS se puede integrar con la base de datos que se tiene y con los shape-file existentes. Para este caso en especial se utilizó la información existente en el Atlas de Páramos en lo referente a los polígonos de los distritos de páramos de Boyacá y se integró al resultado obtenido en SWAT; igualmente se utilizaron el shape-file de los municipios y las veredas que hacen parte de las cuencas identificadas a partir de la red hídrica existente. El resultado se muestra a continuación.



Figura 4: Ubicación Geográfica de las Cuencas con respecto a los municipios y área de páramos.

Como el programa permite integrar tablas de datos con la interface, se procedió a *determinar la precipitación* media de la cuenca a partir del método de polígonos de thiessen; para este fin se creó un shape-file con la información referente a las estaciones climáticas del área de las cuencas y para la cuenca en general.

Este procedimiento es muy fácil y exacto con lo cual en la tabla de atributos del shape-file permite calcular parámetros como área, perímetro, y almacenar la información referente a la precipitación mensual



Figura 5: Ubicación geográfica de las estaciones utilizadas en el estudio.

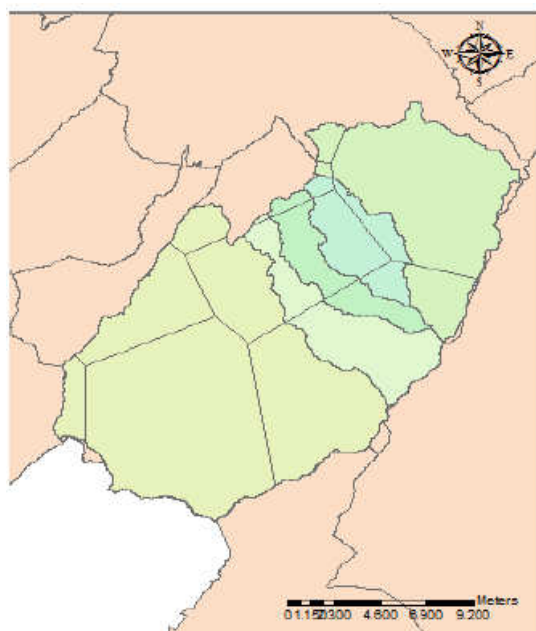


Figura 6: Determinación de los polígonos de Thiessen

Luego de estos procedimientos, se determinaron los parámetros

morfométricos de interés para cada cuenca en particular, esto gracias a que SWAT provee información importante por medio shape-files y geodatabases que es fácil de calcular en ArcGIS.

Tabla 1: Parámetros Morfométricos de las Cuencas que hacen parte del Páramo de la Cortadera.

Cuenca	Área (Km ²)	Perímetro (Km)	Ancho (Km)	Densidad drenaje	Coefficiente compacidad	Factor de forma	Pendiente promedio %	Índice de alargamiento
Rio Cormecheque	164,01	62,37	12,1	0,0019	1,374	0,530	8,55	1,12
Rio Toca	30,46	36,42	3,4	0,0023	1,872	0,218	10,67	3,38
Quebrada La Raiba	17,90	29,17	2,05	0,0023	1,945	0,291	8,16	5,14
Quebrada La Colorado	20,97	23,85	3,90	0,0025	1,468	0,285	7,20	2,23
Rio Chorrera	67,04	45,57	8,06	0,0020	1,570	0,656	9,48	1,70

Cuenca	Cauce principal	Longitud corriente principal (Km)	Longitud total corrientes (Km)	Longitud axial de la cuenca (Km)	Pendiente media cauce (%)	Tiempo de concentración (min)
Rio Cormecheque	Rio Cormecheque	23,838	309,359	17,565	6,56	172
Rio Toca	Rio Toca	14,690	70,454	11,824	9,11	76
Quebrada La Raiba	Quebrada La Raiba	12,584	41,208	7,844	9,63	62
Quebrada La Colorado	Quebrada La Colorado	10,637	52,012	8,575	7,40	68
Rio Chorrera	Rio Chorrera	19,219	133,058	10,114	7,59	120

5. CONCLUSIONES

SWAT permite determinar las cuencas de manera adecuada, sencilla, rápida y exacta con lo cual disminuye el tiempo utilizado en este tipo de procedimientos.



La utilización de SIG facilita el cálculo de parámetros morfométricos y la interacción con tablas, gráficos y shape-files.

Es una herramienta poderosa, computacionalmente eficiente, fácil de utilizar y sin inversión excesiva de tiempo o dinero.

Requiere de entradas fácilmente disponibles o que pueden ser creadas a partir de otros datos.

Es un software de libre acceso, fácil de manejar y que puede ser integrado con los SIG para el cálculo de parámetros hidrológicos e interpolaciones.

El uso de tecnología en cuanto al modelamiento de sistemas hidrológicos asociada a Sistemas de Información Geográfica (SIG) garantiza excelentes resultados ya que los cálculos computacionales son más aproximados que los realizados con nomogramas.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

Amaras, 2009. Diagnóstico, Evaluación y Estado actual de las Áreas de Páramo que hacen parte del páramo de cortadera en los municipios de Tuta, Pesca, Toca y

Siachoque Departamento de Boyacá. Tunja, marzo de 2009.

Armenteras *et al.*, 2003. Andean forest fragmentation and the representativeness of protected natural areas in the eastern Andes, Colombia. D. Armenteras, F. Gast, H.

Villareal. Instituto de Investigación de Recursos Biológicos Alexander von Humboldt, Calle 37 # 8-40 Mezzanine, Bogotá, Colombia. Biological Conservation 113. p 245–256.

Buytaert *et al.*, 2006. Human impact on the hydrology of the Andean páramos. Wouter Buytaert, Rolando Céleri, Bert De Bièvre, Felipe Cisneros, Guido Wyseure, Jozef Deckers, Robert Hofstede, Earth-Science Reviews 79. p 53–72.

Chen, J and Wu, Y. 2012. Advancing representation of hydrologic processes in the Soil and Water Assessment Tool (SWAT) through integration of the TOPographic MODEL (TOPMODEL) features. Journal of Hydrology 420–421, 319–328.

Díaz-Granados, Mario A, Navarrete Gonzales, Juan D y Suarez López, Tatiana. Páramos Hidrosistemas Sensibles. 2005. Revista de Ingeniería No. 22. Facultad de Ingeniería. Universidad de los Andes.

IAvH. 2011. Concepto técnico pertinente a la delimitación y caracterización del sistema paramuno en el área de la Serranía de Santurban Ubicada en el departamento de Santander, solicitado por la dirección de Licencias- Ministerio de Ambiente, Vivienda y Desarrollo Territorial. En:

http://www.humboldt.org.co/iavh/documentos/Concepto_Tecnico_IAVH_2400-2-21420-Santurban.pdf.

Consultado Junio 16 de 2011.

Ministerio del Medio Ambiente.





2002. Programa para el Manejo Sostenible y Restauración de Ecosistemas de la Alta Montaña Colombiana: PÁRAMOS.

Bogotá D.C., Colombia.

En:

<http://www.banrepcultural.org/blaavirtual/geografia/congresoparamo/programa-nacional.pdf>. Consultado Noviembre 06 de 2011.

Morales M., Otero J., Van der Hammen T., Torres A., Cadena C., Pedraza C., Rodríguez N., Franco C., Betancourt J.C., Olaya E., Posada E., y Cárdenas L. 2007. Atlas de Páramos de Colombia. Instituto de Investigación de Recursos Biológicos Alexander Von Humboldt. Bogotá, D.C. 208 p.

Navarrete, J.D. 2004. Hidrología de Páramos, Modelación de la Cuenca Alta del Río Blanco con AVSWAT 2000. Universidad de los Andes. Departamento de Ingeniería Civil y Ambiental. Bogotá. Colombia.

Ruiz et al., 2008. Changing climate and endangered high mountain ecosystems in Colombia. Daniel, Moreno Hernán Alonso, Gutiérrez María Elena, Zapata Paula Andrea. Grupo de Investigación 'Gestión del Ambiente para el Bienestar Social—GABiS', Escuela de Ingeniería de Antioquia. SCIENCE OF THE TOTAL ENVIRONMENT. 398 p. 122 – 132.

Rouholahnejad, E, et al., 2012. A parallelization framework for calibration of hydrological models. Environmental Modelling & Software 31, 28-36.

Schuol, J, et al., 2008. Estimation of

freshwater availability in the West African sub-continent using the SWAT hydrologic Model. Journal of Hydrology, 352, 30– 49.

Tobón, C. 2009. *Los bosques andinos y el agua*. Serie investigación y sistematización #4. Programa Regional ECOBONA – INTERCOOPERATION, CONDESAN. Quito, mayo 2009.

